

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/761>DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>

INVESTIGACIÓN

Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma

Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells

Lina María Romero Millán¹, María Alejandra Cruz Domínguez²,
Fabio Emiro Sierra Vargas³**Fecha de recepción:** 19 de octubre de 2015**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016**Cómo citar:** Romero Millán, L. M., Cruz Domínguez, M. A., & Sierra Vargas, F. E. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. *Revista Tecnura*, 20(48), 89-99. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06

Resumen

Contexto: Teniendo en cuenta que actualmente se producen en Colombia alrededor de 220 000 toneladas de cuesco al año, como subproducto del proceso de transformación de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, el presente trabajo busca establecer el potencial de aprovechamiento energético de esta biomasa residual, a través del proceso de pirólisis lenta.

Método: Usando un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio, se llevaron a cabo pruebas de pirólisis lenta de cuesco de palma en el rango de temperatura comprendido entre 300°C y 500°C. Se analizó la distribución de los productos sólidos, líquidos y gaseosos del proceso, así como el comportamiento del contenido energético del carbonizado y el gas producidos.

Resultados: Se determinó que el carbonizado es el principal producto del proceso, con un rendimiento de hasta 50% en peso y un contenido de hasta 73% de la cantidad de energía presente en la biomasa

original. El contenido energético del carbonizado se incrementó con la temperatura, desde 29,6 MJ/kg para su tratamiento a 300°C, hasta 31,14 MJ/kg a 500°C. Por su parte, el gas producido representó hasta un 13% del contenido energético del cuesco de palma sin pirolizar, con un poder calorífico inferior de hasta 12,5 MJ/m³.

Conclusiones: De acuerdo con los resultados obtenidos, la pirólisis lenta se considera un proceso de especial interés para la valorización de biomásas residuales como el cuesco de palma, a partir de su aprovechamiento energético; y de la producción de materiales con potencial de ser usados como combustibles o precursores de productos de valor agregado.

Palabras clave: Biomasa, Carbonizado, Cuesco de palma de aceite, Pirólisis lenta, Potencial energético.

Abstract

Context: Taking into account that near 220 000 tons of oil palm shells are produced every year in

1 Ingeniera mecánica, Magister en Energías, PhD (c) Ciencia y Tecnología de los materiales. Integrante del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: lmromerom@unal.edu.co

2 Estudiante de Ingeniería Agroindustrial. Integrante del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: maria.cruz@unillanos.edu.co

3 Ingeniero Mecánico. Magister en Automatización Industrial. Doctor en Ingeniería de la Universidad de Kassel. Director del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: fesierav@unal.edu.co

Colombia, as a waste of the *Elaeis Guineensis* palm oil transformation process, the aim of this work is to determine the energy potential of oil palm shells, when transformed through slow pyrolysis process.

Methods: Using a fixed bed lab scale reactor, different oil palm shells pyrolysis tests were performed between 300°C and 500°C. The effect of the temperature in the process product yield and in the energy content of produced solids and gases were analyzed.

Results: With a maximum mass yield of 50%, the char is considered the main product of oil palm shells pyrolysis, containing up to 73% of the raw biomass energy. The heating value of char raised

with the temperature, from 29,6 MJ/kg at 300°C to 31,34 MJ/kg at 500°C. Moreover, the gas produced in the established temperature range had up to 13% of the energy content of the raw biomass, with a heating value near 12,5 MJ/m³.

Conclusions: According to the results, slow pyrolysis can be considered an interesting process for the valorization of residual biomass as oil palm shells, through the production of solids and gases that can be used as fuels, or as precursor of other value-added products.

Keywords: Biomass, Char, Oil palm shells, Slow Pyrolysis, Energy potential.

INTRODUCCIÓN

Dada su ubicación geográfica y sus condiciones climáticas, Colombia cuenta con una gran biodiversidad y un importante potencial de biomásas, tanto agrícolas como pecuarias, a ser explotadas. En general, las actividades agroindustriales en el país producen más de 70.000.000 de toneladas de residuos agrícolas de cosecha e industriales al año, en cultivos de café, plátano, caña, palma de aceite, maíz, banano y arroz (Escalante *et al.*, 2010).

En particular, Colombia se ha posicionado en los últimos años como el primer productor de palma de aceite en América Latina, y el cuarto a nivel mundial, con una producción superior a un millón de toneladas de aceite en 2013, correspondientes a un 1,85% del total de la producción mundial (Fedepalma, 2014). Dentro de los principales residuos de la industria palmera se encuentra el cuesco, con una producción de alrededor de 220.000 toneladas al año (Escalante *et al.*, 2010), considerándose una biomasa con un importante potencial de aprovechamiento. Desde el punto de vista energético, diversos autores han reportado valores de poder calorífico para el cuesco de palma cercanos a los 20 MJ/kg (Okoroigwe y Saffron, 2012; Kong *et al.*, 2014), por lo cual, el estudio de los

diferentes procesos de aprovechamiento energético de esta biomasa se hace importante en la búsqueda de alternativas para su uso en el país.

La pirólisis se presenta, en este marco, como un proceso de especial interés, ya que permite la descomposición de la biomasa en productos sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser aprovechados en diferentes aplicaciones, tanto energéticas como industriales (Park, Lee, Ryu y Park, 2014). En términos generales, la pirólisis es el proceso de descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, en el rango de temperaturas comprendido entre 300 °C y 600 °C; y es considerada el paso previo para procesos como la gasificación o la combustión (Basu, 2013). El rendimiento de los productos de la pirólisis depende en gran medida de la naturaleza de la materia prima utilizada y de los parámetros del proceso, como temperatura, tasa de calentamiento, tamaño de partícula, tiempo de residencia, entre otros (Angin, 2013; Demirbas, 2004; Titiladunayo, McDonald y Fapetu, 2012).

En particular, la pirólisis lenta se lleva a cabo a bajas temperaturas, entre 300 °C y 500 °C, con tasas de calentamiento inferiores a 100 °C/min (Basu, 2010). Estas condiciones permiten un alto rendimiento en la producción de carbonizado, que puede ser utilizado como combustible sólido

fácilmente transportable o distribuible, o como precursor de productos de alto valor, como carbón activado o biochar (Lua, Lau y Guo, 2006; Lee *et al.*, 2013). Los combustibles sólidos, con un mayor poder calorífico que la biomasa original, pueden ser usados en procesos posteriores de combustión o gasificación (Liu y Han, 2015). Por su parte, los gases obtenidos, si bien no constituyen el producto principal del proceso y en muchas ocasiones no son aprovechados, tienen también potencial de ser usados en aplicaciones energéticas o como insumos en la industria química (Park *et al.*, 2014).

En este sentido, el presente trabajo analiza la distribución de los productos sólidos, líquidos y gaseosos, obtenidos a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma en el rango de temperaturas comprendido entre 300 °C y 500 °C, usando un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio. Se estudia además el comportamiento del contenido

energético del carbonizado y el gas producidos, en los niveles de temperatura establecidos, con el fin de determinar el potencial de aprovechamiento energético del cuesco de palma de aceite, como biomasa residual.

METODOLOGÍA

Materias primas

Las pruebas experimentales fueron desarrolladas en el Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá. El cuesco analizado en este estudio proviene de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, cultivada en Cumaral (Meta) (4°16'10"N 73°29'11"O, 500 msnm, temperatura ambiente 21 °C, 2858 mm de precipitación anual). Sus características físicoquímicas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicoquímicas del cuesco de palma utilizado en el presente estudio

Análisis elemental (% masa daf)	C	47,57
	H	6,59
	O*	45,25
	N	0,58
	O/C	0,71
	H/C	1,66
Análisis próximo (% masa)	Humedad	8,81
	MV	69,80
	CF*	19,68
	Cenizas	1,71
Poder calorífico	MJ/kg	19,46

*Valores calculados por diferencia

Fuente: Elaboración propia.

Para su estudio, la materia prima fue tamizada y clasificada con el fin de homogeneizar el tamaño de partícula y eliminar residuos que pudiesen afectar el resultado de las pruebas. Aunque la forma del cuesco de palma es irregular, luego de su

preparación, las partículas se encuentran en el rango de 0,7 cm a 2 cm. La figura 1 presenta una imagen del cuesco de palma luego de su proceso de limpieza y clasificación.

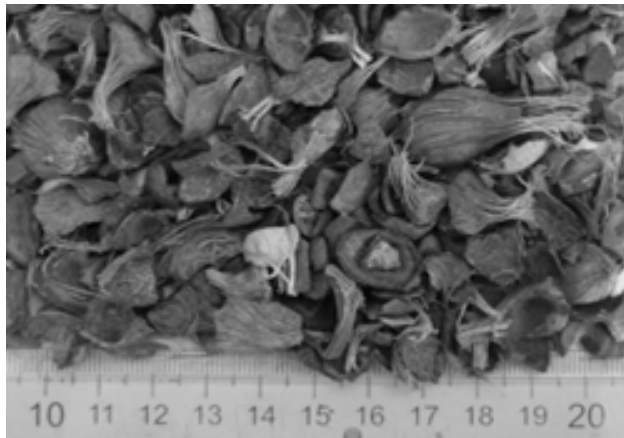


Figura 1. Fotografía del cuesco de palma de aceite.
Dimensiones en cm

Fuente: Elaboración propia.

Descripción del sistema de pirólisis

El equipo utilizado para la experimentación es un reactor cilíndrico de lecho fijo a escala de laboratorio, de 30 cm de altura y 18,5 cm de diámetro,

construido en acero. La energía para el proceso es suministrada usando dos resistencias eléctricas de 1000 W cada una, protegidas y aisladas del exterior con un recubrimiento en concreto refractario, que además hace las veces de aislante térmico. Un sistema de control de temperatura integrado al equipo permite alcanzar con precisión la temperatura objetivo para cada una de las pruebas. A la tapa del reactor se acoplan una termocupla tipo K para el monitoreo de la temperatura de la biomasa, y una válvula, por donde se hace la recuperación del material volátil generado durante el proceso de pirólisis. El montaje experimental, cuenta además con un *scrubber* o lavador a baja temperatura ($0\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), cuya finalidad es recolectar la fracción condensable presente en el gas producido. A la salida del lavador, un contador de gas tipo tambor marca Ritter TG1 y un analizador de gases infrarrojo marca Cubic Gasboard 3100P, permiten establecer la cantidad y la composición del gas del proceso. El montaje del sistema se presenta de manera detallada en la figura 2.

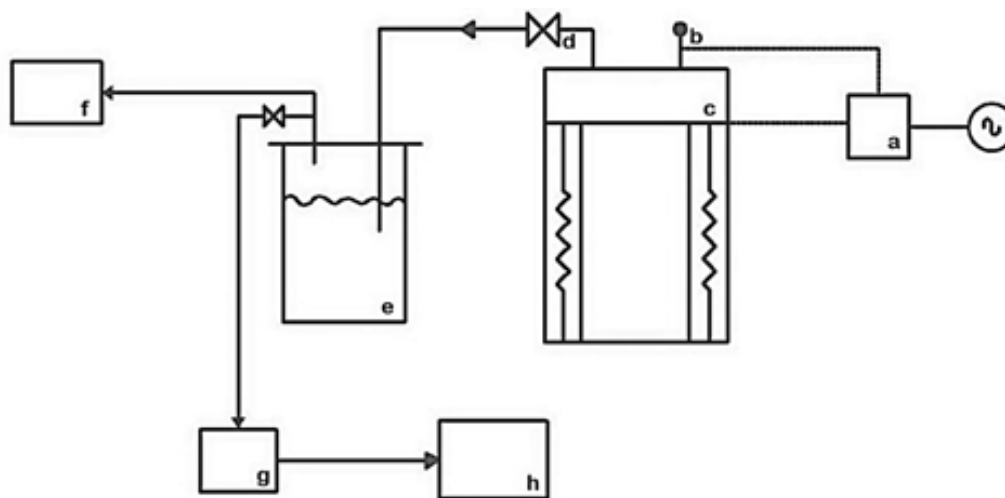


Figura 2. Montaje experimental y esquema del sistema de pirólisis: a) Controlador de temperatura, b) Termocupla tipo K, c) Pirolizador, d) Salida del material volátil, e) Scrubber, f) Contador de gas, g) Filtro de agua y carbón activado, h) Analizador de gases

Fuente: Elaboración propia.

La pirólisis lenta del cuesco de palma fue estudiada para temperaturas comprendidas entre 300 °C y 500 °C, con lo cual la tasa de calentamiento se mantuvo constante en 3 °C/min. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, el tiempo del proceso fue de una hora. Durante la prueba, la composición de los gases fue medida cada 10 minutos usando el analizador de gases marca Cubic Gasboard 3100P. Luego de cada experiencia, la cantidad de carbonizado y de condensables producidos fue determinada con la ayuda de una balanza. La producción de gas fue medida usando el contador de gas presente en el montaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de los productos obtenidos

Los resultados de las pruebas indican que la temperatura de pirólisis tiene un efecto importante en la generación de subproductos sólidos, líquidos

y gaseosos. La figura 3 muestra el porcentaje en masa de los subproductos del proceso en función de la temperatura.

Se observa que la cantidad de char o carbonizado disminuye a medida que la temperatura de pirólisis aumenta, dando paso a un incremento en la producción de gas y aceites. A 300 °C predomina el subproducto sólido con un 50 % de la masa inicial de biomasa pirolizada, mientras que el gas y el líquido corresponden a un 18 % y un 32 %, respectivamente. Con una temperatura de pirólisis de 500 °C, la producción de material sólido disminuye hasta un 33 %, mientras que el producto líquido predomina, llegando hasta un 43 %. En general, el porcentaje de producción de gas se mantiene entre 18 % y 24 % para el rango de temperaturas estudiado.

El comportamiento encontrado está relacionado con la composición estructural del cuesco de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, cuyo contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina se encuentra

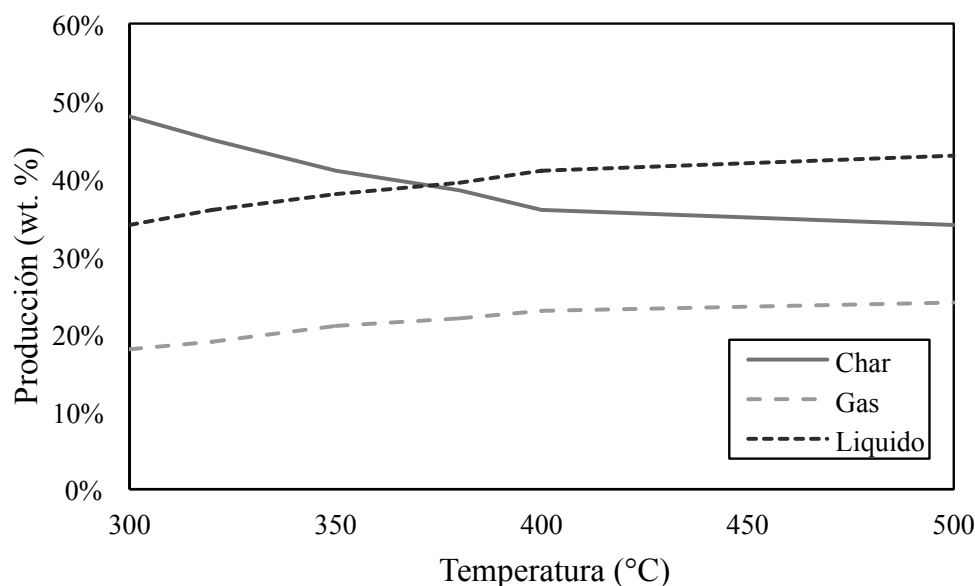


Figura 3. Distribución de los subproductos obtenidos en la pirólisis del cuesco de palma

Fuente: Elaboración propia.

reportado en la literatura (García, García y Das, 2008). La baja producción de gas a partir de la pirólisis de esta biomasa podría estar relacionada con su contenido de hemicelulosa, que se encuentra alrededor de un 12 %, porcentaje que se considera bajo, en comparación con la composición de celulosa y lignina, que son de alrededor de 30 % y 50 %, respectivamente. En términos generales, la hemicelulosa y la lignina son los componentes constitutivos de la biomasa que mayor contribución tienen frente a la producción de gases no condensables y carbonizados, respectivamente (Basu, 2013). En cuanto al porcentaje de char obtenido en el rango de temperaturas estudiado, se considera que el cuesco de palma de aceite tiene un rendimiento de producción interesante, relacionado con su alto contenido de lignina. En este sentido, esta biomasa podría ser aprovechada en la producción de carbonizados, para su uso como combustible sólido, biochar, o para la fabricación de carbones activados, con varios trabajos reportados por diferentes autores en esta línea (Lua, Lau y Guo, 2006; Gómez, Klose y Rincón, 2010).

Potencial energético del carbonizado

Las pruebas experimentales desarrolladas permitieron ver el efecto de la temperatura en el rendimiento de la producción de sólidos, líquidos y

gases a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma de aceite. Se evidenció que para el caso del carbonizado, una mayor temperatura de proceso está relacionada con una mayor descomposición térmica de la biomasa y, por ende, una menor producción de sólidos. El cuesco de palma de aceite, dado su importante contenido de lignina, permite sin embargo la obtención de altos rendimientos de productos sólidos, por lo cual, el estudio del potencial energético de estos cobra gran importancia. La composición y el poder calorífico del carbonizado obtenido en cada una de las pruebas fueron determinados experimentalmente, con el apoyo del laboratorio de carbones del Servicio Geológico Colombiano. Los resultados de estos análisis son presentados en la tabla 2 para los carbonizados obtenidos a temperaturas de pirólisis de 300 °C, 400 °C y 500 °C.

Se observa que la degradación de la biomasa tiene consecuencias en su composición elemental. Los análisis permiten evidenciar que el porcentaje de carbono (C) se incrementa con la temperatura de pirólisis, mientras que los contenidos de hidrógeno (H) y oxígeno (O) se ven reducidos. De la misma forma, el contenido de materia volátil (MV) se hace menor con el incremento en la temperatura de proceso, mientras que el porcentaje de carbono fijo (CF) aumenta.

Tabla 2. Propiedades del carbonizado de la pirólisis del cuesco de palma de aceite

		Temperatura de pirólisis		
		300 °C	400 °C	500 °C
Análisis elemental (% masa <i>daf</i>)	C	77,83	78,49	81,15
	H	4,87	4,31	3,69
	O	16,55	16,56	14,44
	N	0,75	0,64	0,72
	O/C	0,16	0,13	0,10
	H/C	0,75	0,64	0,55
Análisis próximo (% masa)	MV	40,59	35,10	28,15
	CF	57,10	62,05	68,48
	Cenizas	2,31	2,85	3,37
Poder calorífico	MJ/kg	29,60	30,59	31,14

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis elemental del cuesco de palma y sus carbonizados, las relaciones atómicas H/C y O/C son indicadas en el diagrama de Van Krevelen, presentado en la figura 4. Se observa que con el incremento de la temperatura de proceso las relaciones atómicas se reducen siguiendo una tendencia lineal. Este comportamiento es de esperarse, dado que a medida que avanza la descomposición térmica de la biomasa, se liberan compuestos volátiles que contienen tanto oxígeno como hidrógeno, dando lugar a un sólido rico en carbono (Park *et al.*, 2014). Los valores bajos para las relaciones H/C y O/C obtenidos, indican mayores grados de carbonización de los productos sólidos.

De la misma manera, el incremento en la proporción de carbono está relacionado con el aumento del poder calorífico, lo cual lleva a que la densidad energética del carbonizado sea mayor

a la de la biomasa original. El contenido energético del material pirolizado se incrementa desde 29,6 MJ/kg para su tratamiento a 300 °C, hasta 31,14 MJ/kg a 500 °C. La figura 5 ilustra el comportamiento del poder calorífico superior (PCS) del cuesco y el carbonizado, en función de su porcentaje de carbono. Es posible observar que la relación entre estos parámetros sigue un comportamiento lineal, dejando ver la influencia del contenido de carbono del material sólido en su capacidad energética.

Por consiguiente, a partir del análisis del poder calorífico de los carbonizados y la distribución de los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis, se encuentra que en el rango de temperaturas estudiado, más del 50 % de la energía inicial contenida en la biomasa se halla en el sólido. Para el caso de la pirólisis a 300 °C, un 73 % de

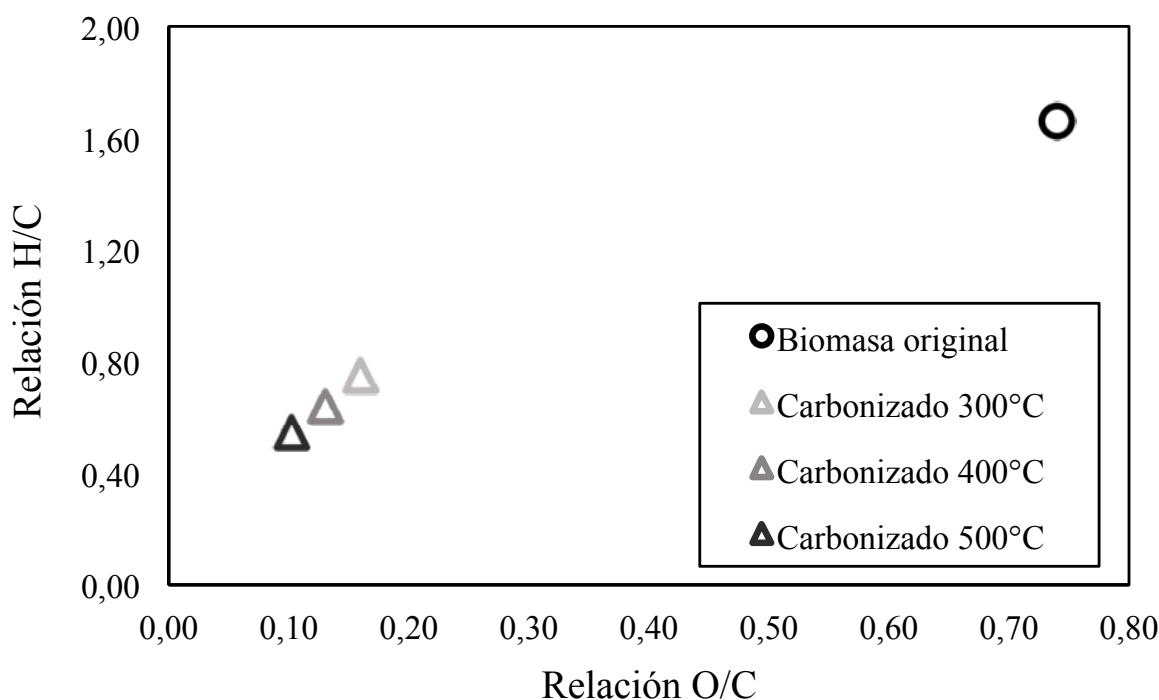


Figura 4. Diagrama de Van Krevelen para el cuesco de palma y el carbonizado de pirólisis

Fuente: Elaboración propia.

la energía inicial de la biomasa se encuentra en el carbonizado, mientras que a 500 °C, este valor es de 53 %. En este sentido, por cada kilogramo de cuesco de palma pirolizado a 500 °C se tienen 10,27 MJ de energía potencialmente aprovechable, en el producto sólido obtenido.

De acuerdo con lo anterior, el uso del carbonizado de la pirólisis como combustible sólido podría considerarse como una alternativa de aprovechamiento energético del cuesco de palma, ya sea a granel o luego de un proceso de compactación y densificación.

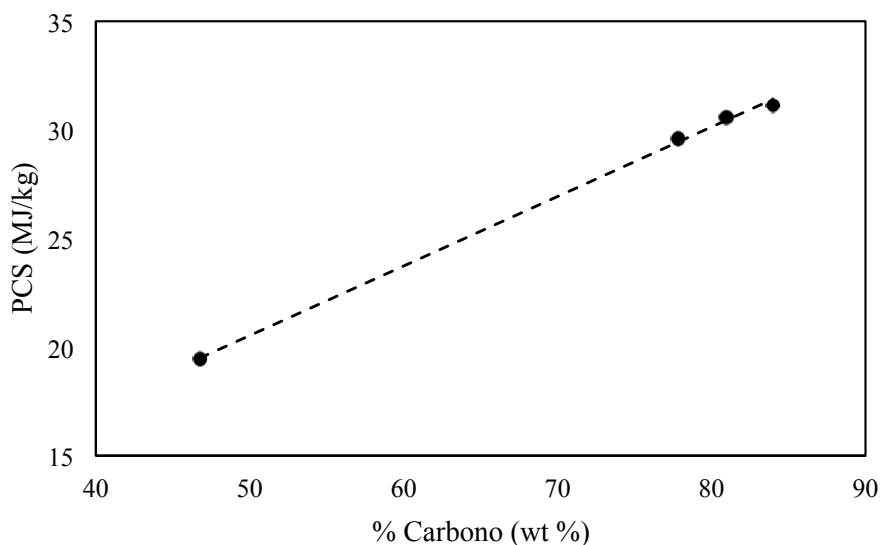


Figura 5. PCS del cuesco de palma y su carbonizado en función del porcentaje de carbono

Fuente: Elaboración propia.

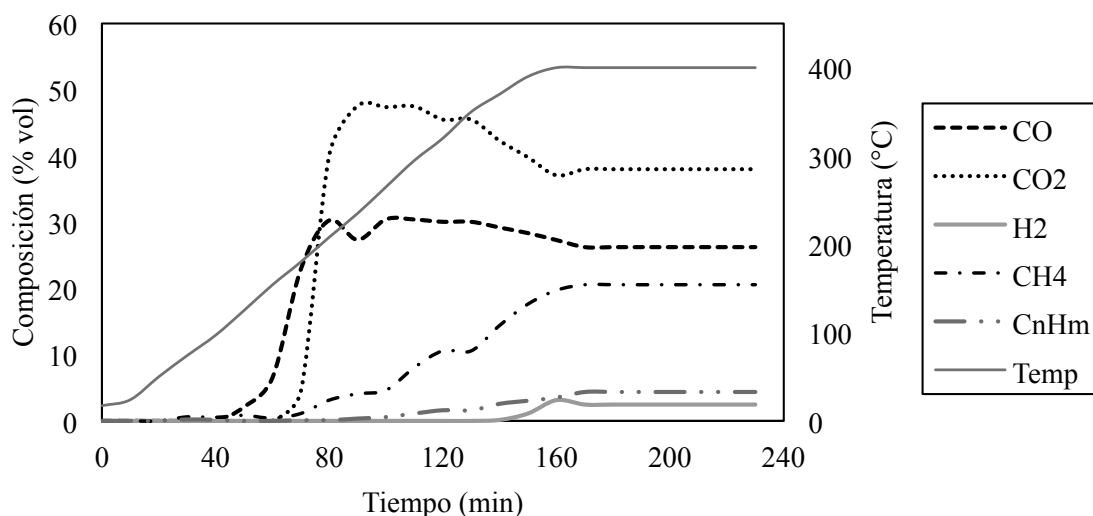


Figura 6. Evolución de la composición promedio de los gases medidos para la pirólisis del cuesco de palma a 400 °C

Fuente: Elaboración propia.

Potencial energético del gas

Además del potencial energético de los productos sólidos obtenidos en el proceso de pirólisis del cuesco, el comportamiento de la composición y contenido energético del gas también fue estudiado. Una vez alcanzada la temperatura de pirólisis establecida, se determinó el promedio de la composición de cada gas, medida a lo largo de los 60 minutos de cada prueba. En la figura 6 se ilustra la evolución de la composición promedio del gas producido, en función del tiempo, para el caso de la pirólisis a 400 °C. La figura 7, por su parte, muestra la evolución de la composición promedio del gas, una vez alcanzadas las temperaturas objetivo en el rango analizado, así como el comportamiento de su poder calorífico.

En la figura 6 se observa que entre los 200 °C y 300 °C el gas producido durante la pirólisis del cuesco se compone principalmente de CO y CO₂, con un pequeño porcentaje de CH₄. En la medida en la que la temperatura se incrementa, la cantidad de CH₄ en el gas se hace más importante. En

una primera etapa, se considera que la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa está relacionada con los altos porcentajes de concentración de CO y CO₂ registrados (Yang *et al.*, 2007). Una vez la temperatura alcanza los 400 °C se observa una disminución en la proporción del CO₂ y un incremento en la del CH₄, llegando este último a valores cercanos al 17 %. Por encima de los 300 °C, la producción gradual de CH₄ podría estar relacionada en cierta medida con la descomposición de la lignina presente en la biomasa (Yang *et al.*, 2007).

Por otra parte, la variación de la composición promedio de los gases obtenidos una vez alcanzada la temperatura objetivo, presentada en la figura 7, permite observar que la concentración de CO₂ en el gas disminuye con el incremento de la temperatura, mientras que la proporción de CH₄ e H₂ se incrementa, llegando a valores cercanos a 19 % y 4 %, respectivamente, a una temperatura de 500 °C. Por encima de los 400 °C se observa un incremento gradual en los contenidos de H₂ y C_nH_m en el gas producido. Este último representa

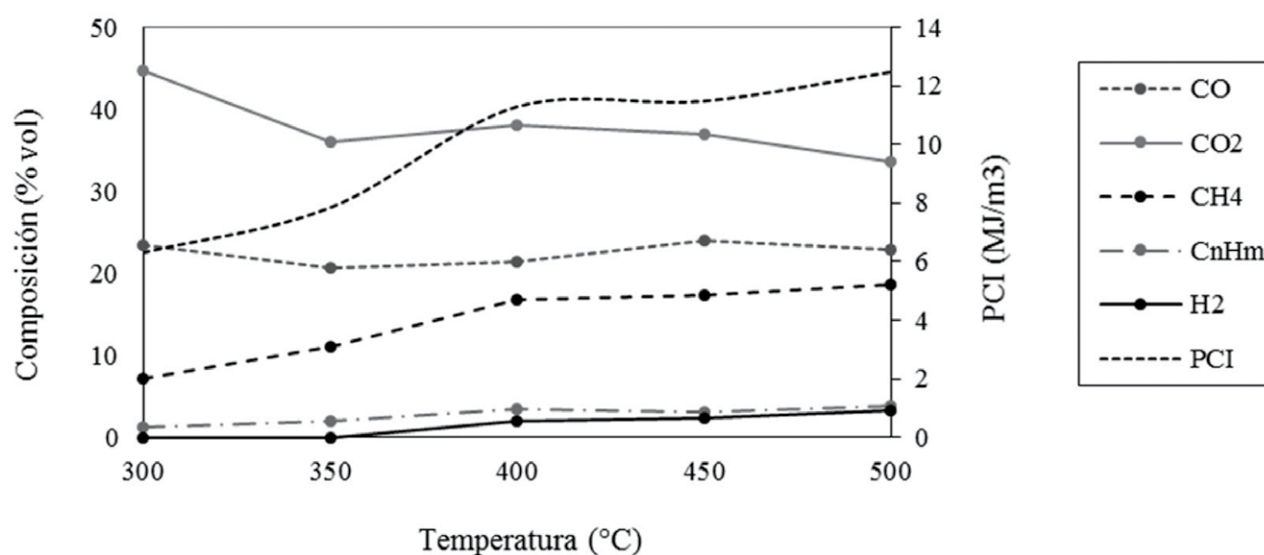


Figura 7. Composición del gas obtenido y su poder calorífico inferior

Fuente: Elaboración propia.

compuestos como C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 y C_3H_8 (Park *et al.*, 2014). Se evidencia igualmente que el poder calorífico de los gases se incrementa con la temperatura, lo que se relaciona en gran proporción con los contenidos de CO , CH_4 y H_2 . El valor del poder calorífico inferior de los gases se encuentra entre $6,3 \text{ MJ/m}^3$ ($5,2 \text{ MJ/kg}$) para 300°C y $12,5 \text{ MJ/m}^3$ ($10,7 \text{ MJ/kg}$) para 500°C . A mayor temperatura, se obtiene, además de una mayor producción de gases, un mayor contenido energético en estos.

Es de notar que, a pesar de que el contenido energético de los gases de pirólisis es inferior al del carbonizado, su potencial no es despreciable. Teniendo en cuenta el rendimiento de producción de gas para el rango de temperaturas estudiado, entre un 18 % y un 24 % de la masa de materia prima pirolizada es transformada en gases, que podrían ser quemados para la producción de calor utilizable en el mismo proceso de pirólisis o en otros procesos. En este sentido, tomando el caso de la pirólisis del cuesco de palma a 500°C , por cada kilogramo de biomasa, se tendrían aproximadamente $2,5 \text{ MJ}$ de energía disponible en el gas producido.

CONCLUSIONES

El proceso de pirólisis de biomasa permite la transformación de la materia prima en productos sólidos, líquidos y gaseosos con potencial de aprovechamiento energético. Para el caso de la pirólisis lenta del cuesco de palma, se obtuvieron altos rendimientos de producción de carbonizado en el rango de temperaturas estudiado, encontrándose estos entre el 33 % y el 50 % de la masa inicial.

Desde el punto de vista energético, teniendo en cuenta el contenido de carbono y poder calorífico, se considera que el carbonizado es el principal producto de la pirólisis en el rango de temperaturas analizado. En consecuencia, el uso de este como combustible sólido se considera viable, ya sea a granel o luego de un proceso de compactación. Al tener una mayor densidad energética, el

carbonizado puede ser transportado con mayor facilidad que la biomasa original, para su uso posterior en procesos de combustión o gasificación. Por otra parte, la alta proporción de carbono identificada en los carbonizados y su alto rendimiento, ha sugerido también su uso como precursores de carbones activados.

En cuanto a los gases, mayores temperaturas de pirólisis están relacionadas con una mayor producción de gas y un mejor poder calorífico. En este contexto, el potencial energético de los gases podría ser aprovechable en diversos procesos, incluyendo la pirólisis, para suplir parte del calor necesario para su desarrollo. Sin embargo, teniendo en cuenta que la pirólisis requiere de una atmósfera inerte para llevarse a cabo, las alternativas para el calentamiento indirecto del proceso requerirán del uso de intercambiadores de calor, y deberán estudiarse en detalle en función de cada aplicación. Aún con esta aclaración, es de resaltar que el contenido de energía de los gases de pirólisis puede llegar a representar hasta un 13 % de la energía disponible en la biomasa inicial, por lo cual, su potencial debe ser tenido en cuenta.

Por consiguiente, la pirólisis lenta se constituye como un proceso de especial interés para la valorización de biomasa residual como el cuesco de palma, a partir de su aprovechamiento energético; y de la producción de materiales con potencial de ser usados como combustibles o precursores de productos de valor agregado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Geológico Colombiano, por su apoyo en la realización de las pruebas de caracterización físico-química de la materia prima y los carbonizados del proceso. A las empresas extractoras de aceite de palma: Unipalma S.A. y La Mejorana S.A., por la información y materias primas suministradas para el estudio, y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), por la financiación

otorgada para el proyecto con código 1101-701-49238, en el marco de la convocatoria 701-2014.

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), en el marco de la convocatoria 701-2014 – “Convocatoria para el apoyo al desarrollo y validación precomercial y comercial de prototipos funcionales de tecnologías biológicas, biomédicas y energéticas con alto potencial de crecimiento empresarial”.

REFERENCIAS

- Angin, D. (2013). Effect of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on Biochar Obtained from Pyrolysis of Safflower Seed Press Cake. *Bioresource Technology*, 128, 593–597. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.150>
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design*. 1a. ed. Oxford: Elsevier Inc.
- Basu, P. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. En: P. Basu *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp. 147–176). 2a. ed. Londres: Elsevier Inc. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00005-8>
- Demirbas, A. (2004). Effects of Temperature and Particle Size on Bio-Char Yield from Pyrolysis of Agricultural Residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243–248. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Escalante, H.; Orduz, J.; Zapata, H.J.; Cardona, M.C. y Duarte, M. (2010). *Atlas de Biomasa: UPME. Anexo E. Potencial energético de la biomasa residual*. Recuperado de: http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo_E_Potencial_energetico_departamental.pdf
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) (2014). *Anuario Estadístico de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo*. Bogotá, Colombia.
- García, J.A.; García, M.P. y Das, K.C. (2008). Determinación de los parámetros cinéticos de degradación térmica de los subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Revista Palmas*, 29(4), 31-46.
- Gómez, A.; Klose, W. y Rincón, S. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura*. Kassel: Kassel University Press.
- Kong, S.H.; Loh, S.K.; Bachmann, R.T.; Rahim, S.A. y Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729–739. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>
- Lee, Y.; Park, J.; Ryu, C.; Gang, K.S.; Yang, W.; Park, Y.K.; ... Hyun, S. (2013). Comparison of Biochar Properties from Biomass Residues Produced by Slow Pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, 148, 196–201. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.135>
- Liu, Z. y Han, G. (2015). Production of Solid Fuel Biochar from Waste Biomass by Low Temperature Pyrolysis. *Fuel*, 158, 159–165. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.032>
- Lua, A.C.; Lau, F.Y. y Guo, J. (2006). Influence of Pyrolysis Conditions on Pore Development of Oil-Palm-Shell Activated Carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 76(1-2), 96–102. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.08.001>
- Okoroigwe, E. y Saffron, C. (2012). Determination of Bio-Energy Potential of Palm Kernel Shell by

Physicochemical Characterization. *Nigerian Journal of Technology*, 31(3), 329–335. Recuperado de: <http://nijotech.com/index.php/nijotech/article/view/561>

Park, J.; Lee, Y.; Ryu, C. y Park, Y.K. (2014). Slow Pyrolysis of Rice Straw: Analysis of Products Properties, Carbon and Energy Yields. *Bioresource Technology*, 155, 63-70. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.084>

Titiladunayo, I.F.; McDonald, A.G. y Fapetu, O.P. (2012). Effect of Temperature on Biochar Product Yield from Selected Lignocellulosic Biomass in a Pyrolysis Process. *Waste and Biomass Valorization*, 3(3), 311–318. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s12649-012-9118-6>

Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, D.H. y Zheng, C. (2007). Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781–1788.

